

## **Раздел 2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В комплексе мероприятий, направленных на повышение качества электрической энергии, существенное значение имеет вопрос распространения несимметрии напряжений и токов в трехфазных сетях промышленных предприятий. Решение этого вопроса позволяет повысить надежность электроснабжения, а также снизить потери электроэнергии.

В последнее время в современных системах электроснабжения возросло количество несимметричных нагрузок со значительной единичной мощностью. Отрицательное влияние несимметрии напряжений и токов на работу электрооборудования отмечено во Введении.

В данном разделе рассматривается проблема повышения качества электроэнергии путем симметрирования токов и напряжений в трехфазных сетях. Для решения этой проблемы получены и теоретически обоснованы новые аналитические выражения для определения параметров симметрирующего устройства при общем случае несимметричной нагрузки как для трехпроводной, так и для четырехпроводной трехфазной сети. Параллельно с этим решается задача о получении требуемого коэффициента мощности. Проведена оценка погрешности и устойчивости процесса симметрирования трехфазных сетей.

В результате решения поставленной задачи получены значения параметров симметрирующего устройства при произвольной исходной несимметрии, т.е. решена задача синтеза параметров симметрирующих устройств и отпадает необходимость решения задачи синтеза для каждого отдельного частного случая несимметрии с использованием ЭВМ и аналитическими методами.

Метод решения общей задачи и его результаты оказываются в данном случае проще различных частных случаев, поскольку учитывается внутренняя симметрия, присущая трехфазной сети в целом.

## **2.1. Анализ основных путей устранения несимметрии напряжений и токов с одновременной компенсацией реактивной мощности в системах электроснабжения**

Неравномерная нагрузка фаз вызывает несимметрию токов. Несимметрия токов, в свою очередь, может вызвать несимметрию напряжений. Поэтому несимметрия токов должна устраняться в трехфазных сетях [44 - 49].

Одним из наиболее простых методов уменьшения несимметрии напряжений (токов) в ходе эксплуатации СЭС является выравнивание токов фаз естественным путем, т.е. равномерным распределением однофазных нагрузок по фазам [44]. Однако в действительности достичь этого практически не удастся. Поэтому приходится применять специальные методы и средства симметрирования трехфазных систем. Одним из путей уменьшения несимметрии напряжений является увеличение сечения проводов и мощности питающих трансформаторов [49]. В четырехпроводных сетях стараются различными методами уменьшить сопротивление нулевого провода [49]. Эти методы неэффективны, так как требуют значительного перерасхода дорогостоящих материалов. Кроме того, полностью устранить несимметрию напряжения не удастся. Следует также учитывать, что в последнее время электротехнология претерпела явные изменения. Увеличилось количество однофазных нагрузок (печи ЭШП) и возросла мощность единичных трехфазных нагрузок [45 - 47].

В настоящее время для устранения несимметрии применяют специальные симметрирующие устройства (СУ), которые позволяют устранить токи нулевой и обратной последовательности [47]. В [50] предложена следующая градация способов симметрирования:

- преобразовательный способ, основанный на преобразовании видов энергии [51, 52];
- коммутационный способ, основанный на циклической коммутации однофазной нагрузки к фазам сети [53 - 55];
- фильтровый способ, основанный на неодинаковости параметров по отношению к составляющим различных фазовых последовательностей [56 - 58];

- компенсационный способ, основанный на компенсации тока (напряжения) нулевой и обратной последовательностей с помощью специального СУ [46, 47, 59 - 64].

В системах электроснабжения наибольшее применение нашел компенсационный способ, имеющий более высокие технические показатели по сравнению с остальными [50]: создание унифицированных средств, позволяющих снизить одновременно с несимметрией токов (напряжений) и уровни высших гармоник, компенсировать реактивную мощность [65 ÷ 67]; высокие энергетические показатели [50]; возможность симметрирования с заданной точностью [68].

Синтез параметров СУ осуществляется исходя из условий поддержания в допустимых пределах несимметрии напряжений и токов при высоком коэффициенте мощности и минимальной мощности элементов СУ.

Симметрирующие устройства, использующие компенсационный способ, могут быть регулируемыми и нерегулируемыми. При построении этих устройств используются электрические или электромагнитные связи [46, 50]. При неизменной величине симметрирующих элементов обеспечивается симметрирование только при одном значении мощности нагрузки. В СЭС изменение параметров нагрузки происходит постоянно, что может привести к превышению допустимой несимметрии напряжения, поэтому возникает необходимость применения СУ с изменяющимися параметрами [46].

Решая вопросы симметрирования, необходимо одновременно решать вопросы компенсации реактивной мощности. Этой проблеме посвящена работа [65]. Однако полученные выражения являются очень сложными, так как при их выводе не были в явном виде учтены условия отсутствия нулевой составляющей токов.

Учитывая сказанное, можно сделать вывод, что для современных СЭС необходимы унифицированные симметрирующие устройства, позволяющие устранить несимметрию напряжений (токов) и скомпенсировать реактивную мощность в трех- и четырехпроводных сетях при наличии в них нелинейных искажений и изменения нагрузки по случайному закону.

## 2.2. Симметрирование трехфазной сети с нулевым проводом

Рассмотрим трехфазную четырехпроводную сеть, представленную на рис. 2.1, где система фазных напряжений источника симметричная, а нагрузка несимметричная. В этом случае справедливы следующие соотношения:

$$\underline{U}_A = U; \underline{U}_B = a^2 U; \underline{U}_C = a U. \quad (2.1)$$

При несимметричном приемнике линейные токи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  образуют несимметричную систему. Пусть они содержат все три симметричные составляющие, основные векторы которых определяются из выражения (1.2). Выразим токи симметричного устройства СУ1  $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$  через проводимости симметрирующего устройства и фазные напряжения генератора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}'_A &= \underline{U}_A Y'_A = U Y'_A; \\ \underline{I}'_B &= \underline{U}_B Y'_B = a^2 U Y'_B; \\ \underline{I}'_C &= \underline{U}_C Y'_C = a U Y'_C. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Тогда симметричные составляющие фазного тока СУ1 равны:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}'_1 &= \frac{1}{3} (\dot{I}'_A + a \dot{I}'_B + a^2 \dot{I}'_C) = \frac{1}{3} U (Y'_A + Y'_B + Y'_C); \\ \dot{I}'_2 &= \frac{1}{3} (\dot{I}'_A + a^2 \dot{I}'_B + a \dot{I}'_C) = \frac{1}{3} U (Y'_A + a Y'_B + a^2 Y'_C); \\ \dot{I}'_0 &= \frac{1}{3} (\dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C) = \frac{1}{3} U (Y'_A + a^2 Y'_B + a Y'_C). \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

В этих выражениях введем следующие обозначения проводимостей:

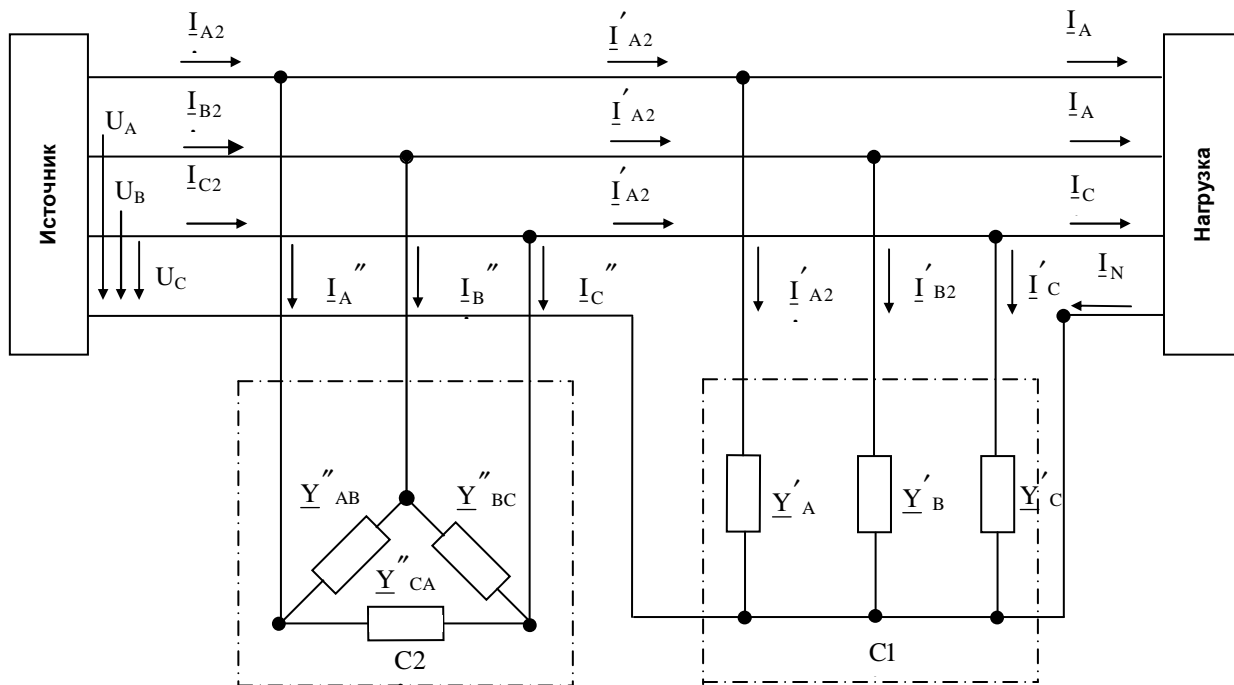


Рис. 2.1 – Четырехпроводная трехфазная сеть с несимметричной нагрузкой

$$\left. \begin{aligned} Y'_1 &= \frac{1}{3} (Y'_A + aY'_B + a^2Y'_C) \\ Y'_2 &= \frac{1}{3} (Y'_A + a^2Y'_B + aY'_C) \\ Y'_0 &= \frac{1}{3} (Y'_A + Y'_B + Y'_C) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

С учетом введенных обозначений имеем

$$\dot{I}'_1 = UY'_0; \dot{I}'_2 = UY'_1; \dot{I}'_0 = UY'_2. \quad (2.5)$$

Для компенсации тока нулевой последовательности приемника необходимо создать в симметрирующем устройстве СУ1 ток, который противоположен по знаку току нулевой последовательности нагрузки

$$\dot{I}'_0 = -\dot{I}'_0 = -UY'_2, \quad (2.6)$$

$$\text{откуда } Y'_2 = -\frac{1}{U} \dot{I}'_0.$$

Это равенство определяет состав и параметры симметрирующего устройства для компенсации токов нулевой последовательности. Симметрирующие элементы, входящие в схему любого симметрирующего устройства, в общем случае могут иметь произвольный характер. Однако наиболее экономичными и получившими наибольшее распространение являются симметрирующие устройства с реактивными элементами. Поэтому проводимости фаз симметрирующих устройств принимают чисто реактивными:

$$Y'_A = -jb_A; Y'_B = -jb_B; Y'_C = -jb_C; \quad (2.7)$$

$$Y''_{AB} = -jb_{AB}; Y''_{BC} = -jb_{BC}; Y''_{CA} = -jb_{CA}.$$

Найдем связь между комплексными проводимостями  $Y'_0$  и

$Y'_1$ , с одной стороны, и комплексной проводимостью  $Y'_2$ , с другой, а следовательно, и током нулевой последовательности  $\dot{I}'_0$ . Для этого введем сопряженные комплексы проводимостей симметрирующего устройства:

$$Y'^*_A = -Y'_A, \quad Y'^*_B = -Y'_B, \quad Y'^*_C = -Y'_C,$$

и сопряженный оператор поворота

$$a = a^2, \quad a^2 = a^*.$$

Учитывая эти соотношения, запишем симметричные составляющие сопряженных комплексных проводимостей симметрирующего устройства СУ1:

$$\left. \begin{aligned} Y'^*_1 &= \frac{1}{3} \left( Y'^*_A + a Y'^*_B + a^2 Y'^*_C \right) = \frac{1}{3} \left( -Y'_A - a^2 Y'_B - a Y'_C \right) = -Y'_2; \\ Y'^*_2 &= \frac{1}{3} \left( Y'^*_A + a^2 Y'^*_B + a Y'^*_C \right) = \frac{1}{3} \left( -Y'_A - a Y'_B - a^2 Y'_C \right) = -Y'_1; \\ Y'^*_0 &= \frac{1}{3} \left( Y'^*_A + Y'^*_B + Y'^*_C \right) = \frac{1}{3} \left( -Y'_A - Y'_B - Y'_C \right) = -Y'_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

т.е.  $Y'^*_0 = -Y'_0$ ,  $Y'^*_1 = -Y'_2$ ,  $Y'^*_2 = -Y'_1$ .

Из выражения (2.8) следует, что проводимость  $Y'_0$  не зависит от проводимости  $Y'_2$ , а следовательно, и от составляющей нулевой последовательности  $\dot{I}'_0$  тока нагрузки. Поэтому проводимость  $Y'_0$  может быть задана произвольно, например,  $Y'_0 = Y_0$ . В то же время проводимость  $Y'_1$  зависит от проводимости  $Y'_2$  и равна  $Y'_1 = Y'^*_2$ .

Таким образом, с учетом выражения (2.6) можно записать следующие соотношения для симметричных составляющих

проводимостей симметрирующего устройства СУ1:

$$\left. \begin{aligned} Y'_1 &= \frac{1}{U} I_0^* \\ Y'_2 &= \frac{1}{U} \dot{I}_0 \\ Y'_0 &= Y_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Соотношения (2.9) являются системой уравнений для проводимостей СУ  $Y'_A$ ,  $Y'_B$ ,  $Y'_C$ . Решая эту систему уравнений, находим:

$$Y'_A = Y'_0 + Y'_1 + Y'_2 = \frac{1}{U} \left( \dot{I}_0 - I_0^* \right) + Y_0 = \frac{2j}{U} J_m \dot{I}_0 + Y_0; \quad (2.10)$$

$$Y'_B = Y'_0 + a^2 Y'_1 + a Y'_2 = -\frac{1}{U} \left( a \dot{I}_0 - a^2 I_0^* \right) + Y_0 = -\frac{2j}{U} J_m a \dot{I}_0 + Y_0;$$

$$Y'_C = Y'_0 + a Y'_1 + a^2 Y'_2 = -\frac{1}{U} \left( a^2 \dot{I}_0 - a I_0^* \right) + Y_0 = -\frac{2j}{U} J_m a^2 \dot{I}_0 + Y_0.$$

В частности, если добиться выполнения условия  $Y'_0 = Y_0 = Y'_A - Y'_B - Y'_C = 0$ , то последнего члена в формулах (2.10) не будет. Таким образом, симметрирующее устройство, параметры которого удовлетворяют равенствам (2.10), позволяет полностью компенсировать токи нулевой последовательности в трехфазной сети.

Проводимости фаз симметрирующего устройства можно выразить не только через ток нулевой последовательности, как это сделано в формулах (2.10), но и через действительные токи приемника.

Подставляя в формулы (2.10) соотношения (1.2), получим



$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U} J_m (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) + Y_0; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U} J_m [a(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)] + Y_0; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U} J_m [a^2(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)] + Y_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Для иллюстрации применения полученных результатов рассмотрим следующие частные случаи. В качестве первого примера рассмотрим симметрирование токов четырехпроводной трехфазной сети при однофазном активном приемнике. Пусть к фазе А четырехпроводной трехфазной сети подключена нагрузка с проводимостью  $g$ . Ток приемника равен

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A g = U_g,$$

а ток нулевой последовательности

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3} \dot{I}_A = \frac{1}{3} U_g.$$

Подставляя это равенство в выражение (2.10) и положив  $Y_0 = 0$ , определим проводимости фаз симметрирующего устройства:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U} J_m \frac{1}{3} U_g; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U} J_m a \frac{1}{3} U_g = -\frac{j}{\sqrt{3}} g; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U} J_m a^2 \frac{1}{3} U_g = \frac{j}{\sqrt{3}} g. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Из полученных соотношений (2.7) и (2.12) следует, что проводимости симметрирующего устройства в фазе А должны быть равны нулю ( $g_A = 0$ ), а проводимости в фазах В и С равны

по модулю  $g_B = |g_C| = g/\sqrt{3}$ , но имеют различный характер в фазе В - чисто индуктивная в фазе С - чисто емкостная. Схема включения элементов симметрирующего устройства показана на рис.2.2.

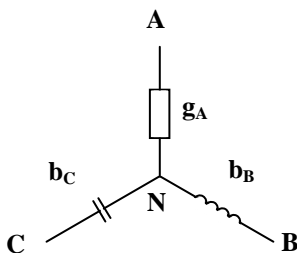


Рис. 2.2 – Симметрирование четырехпроводной трехфазной сети при активной нагрузке

Во втором примере рассмотрим симметрирование токов в четырехпроводной сети при двухфазном активном приемнике. Пусть к фазам А и В четырехпроводной сети подключены приемники, проводимости которых  $g_A$  и  $g_B$  показаны на рис.2.3.

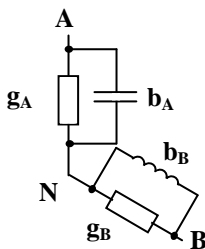


Рис. 2.3 – Симметрирование четырехпроводной трехфазной сети при двухфазной активной нагрузке

Токи в нагрузках равны:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A g_A = U_{g_A} ; \dot{I}_B = \dot{U}_B g_B = a^2 U_{g_B} .$$

Тогда ток нулевой последовательности равен

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B) = \frac{U}{3}(g_A + a^2 g_B) .$$

Подставляя это равенство в выражение (2.10) при условии, что  $Y_0 = 0$ , получим

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= -\frac{2j}{3U} J_m \frac{U}{3} (g_A + a^2 g_B) = -\frac{j}{\sqrt{3}} g_B ; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U} J_m \frac{U}{3} (a g_A + g_B) = -\frac{j}{\sqrt{3}} g_A ; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U} J_m \frac{U}{3} (a^2 g_A + a g_B) = \frac{j}{\sqrt{3}} (g_A - g_B) . \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Из выражения (2.7) и (2.13) следует, что проводимости элементов симметрирующего устройства связаны с проводимостями нагрузок равенствами:

$$g_A = -\frac{g_B}{\sqrt{3}} ; g_B = \frac{g_C}{\sqrt{3}} ; g_C = -\frac{(g_A - g_B)}{\sqrt{3}} .$$

Таким образом, проводимость фазы А имеет емкостной характер, проводимость фазы В – индуктивный; характер проводимости фазы С зависит от соотношения проводимостей приемников. Так, если проводимости приемников равны ( $g_A = g_B$ ), то  $g_C = 0$ . Схема симметрирующего устройства для этого случая приведена на рис.2.3. Если проводимость нагрузки фазы А больше, чем проводимость нагрузки фазы В ( $g_A > g_B$ ), то в фазу С симметрирующего устройства должна быть включена емкостная проводимость. Если же наоборот  $g_B > g_A$ , то в фазу С симметрирующего устройства необходимо включить индуктивную

проводимость.

Схемы симметрирующих устройств, полученные для рассмотренных выше частных случаев однофазного и двухфазного активных нагрузок, подтверждают справедливость предложенной методики [61, 62]. Полученные выражения (2.11) применимы не только в частных случаях, но и в общем случае, для которого известных формул нет.

### 2.3. Симметрирование трехфазных трехпроводных сетей

Считаем, что линейные токи источника  $\underline{I}_{\text{Ag}}, \underline{I}_{\text{Bg}}, \underline{I}_{\text{Cg}}$  не содержат токов нулевой последовательности, которые либо отсутствуют вовсе, либо скомпенсированы симметрирующим устройством СУИ нулевой последовательности, представленным на рис. 2.1. В то же время эти токи имеют составляющие прямой и обратной последовательностей. Выразим основные векторы этих составляющих токов генератора через основные векторы симметричных составляющих токов нагрузки и симметрирующего устройства:

$$\underline{I}_{\Gamma 1} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_1;$$

$$\underline{I}_{\Gamma 2} = \underline{I}_2 + \underline{I}'_2.$$

Подставляя сюда выражения (2.5) для токов  $\underline{I}'_1, \underline{I}'_2$  и учитывая равенство  $\underline{UY}'_1 = \underline{I}_0^*$ , из выражения (2.9) получим

$$\begin{aligned} \underline{I}'_{\Gamma 1} &= \underline{I}_1 + \underline{UY}'_0; \\ \underline{I}'_{\Gamma 2} &= \underline{I}_2 + \underline{UY}'_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_0^*. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Очевидно, что если обеспечить  $\underline{Y}'_0 = 0$ , то компенсация токов нулевой последовательности не меняет тока прямой

последовательности, т.е.  $\underline{I}'_{r1} = \underline{I}_1$ . Выразим линейные токи симметрирующего устройства  $\underline{I}''_A, \underline{I}''_B, \underline{I}''_C$  через фазные напряжения источника и проводимости фаз симметрирующего устройства:

$$\begin{aligned}\underline{I}''_A &= \underline{I}_{AB} + \underline{I}_{AC} = Y''_{AB} \underline{U}_{AB} + Y''_{CA} \underline{U}_{AC} = \\ &= Y''_{AB} (\underline{U}_A - \underline{U}_B) + Y''_{CA} (\underline{U}_A - \underline{U}_C); \\ \underline{I}''_B &= \underline{I}_{BA} + \underline{I}_{BC} = Y''_{BC} \underline{U}_{BA} + Y''_{CB} \underline{U}_{BC} = \\ &= Y''_{AB} (\underline{U}_B - \underline{U}_C) + Y''_{BC} (\underline{U}_A - \underline{U}_C); \\ \underline{I}''_C &= \underline{I}_{CA} + \underline{I}_{CB} = Y''_{CA} \underline{U}_{CA} + Y''_{CB} \underline{U}_{CB} = \\ &= Y''_{CA} (\underline{U}_C - \underline{U}_A) + Y''_{BC} (\underline{U}_C - \underline{U}_B).\end{aligned}\quad (2.15)$$

Полагая, что фазные напряжения источника образуют симметричную систему, представим  $\underline{U}_A = U$ ;  $\underline{U}_B = a^2 U$ ;  $\underline{U}_C = a U$  в равенствах (2.15) и после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned}\underline{I}''_A &= U \left[ (1 - a^2) Y''_{AB} + (1 - a) Y''_{CA} \right] = U(1 - a) (Y''_{CA} - a^2 Y''_{AB}); \\ \underline{I}''_B &= U \left[ (a^2 - 1) Y''_{AB} + (a^2 - a) Y''_{BC} \right] = U(1 - a) (a^2 Y''_{AB} - a Y''_{BC}); \\ \underline{I}''_C &= U \left[ (a - 1) Y''_{CA} + (a - a^2) Y''_{BC} \right] = U(1 - a) (-Y''_{AC} + a Y''_{BC}).\end{aligned}\quad (2.16)$$

Определим основные векторы токов прямой  $\underline{I}''_1$  и обратной  $\underline{I}''_2$  последовательностей симметрирующего устройства СУ2:

$$\begin{aligned}\underline{I}''_1 &= \frac{1}{3} (\underline{I}''_A + a \underline{I}''_B + a^2 \underline{I}''_C) = \frac{1}{3} U(1 - a) \cdot [Y''_{CA} - a^2 Y''_{AB} + \\ &+ (a^2 Y''_{AB} - a Y''_{BC}) + a^2 (-Y''_{CA} + a Y''_{BC})] = \frac{1}{3} U(1 - a) \times \\ &\times (1 - a^2) \cdot (Y''_{AB} + Y''_{BC} + Y''_{CA});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_2'' &= \frac{1}{3} (\underline{I}_A'' + a^2 \underline{I}_B'' + a \underline{I}_C'') = \frac{1}{3} U(1-a) \cdot \left[ Y_{CA}'' - a^2 Y_{AB}'' + \right. \\ &\quad \left. + a^2 \cdot (a^2 Y_{AB}'' - a Y_{BC}'') + a \cdot (-Y_{CA}'' + a Y_{BC}'') \right] = \frac{1}{3} \cdot U \cdot (1-a)^2 \times \\ &\quad \times (Y_{CA}'' + a^2 Y_{BC}'' + a Y_{AB}'') = -U \cdot a \cdot (Y_{CA}'' + a^2 Y_{BC}'' + a Y_{AB}''). \end{aligned}$$

В этих выражениях учтем, что

$$(1-a) = j\sqrt{3}a^2; (1-a^2) = j\sqrt{3}a; (1-a)(1-a^2) = 3; (1-a)^2 = 3a.$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} Y_0'' &= \frac{1}{3} (Y_{BC}'' + Y_{CA}'' + Y_{AB}''); \\ Y_1'' &= \frac{1}{3} (Y_{BC}'' + a Y_{CA}'' + a^2 Y_{AB}''), \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $Y_0''$  и  $Y_1''$  - нулевая и прямая последовательности проводимостей симметрирующего устройства СУ2.

Окончательно получим:

$$\underline{I}_1'' = \frac{1}{3} U \cdot 3(Y_{BC}'' + Y_{CA}'' + Y_{AB}'') = 3U \cdot Y_0''; \quad (2.18)$$

$$\underline{I}_2'' = -U \cdot (Y_{BC}'' + a Y_{CA}'' + a^2 Y_{AB}'') = -3U \cdot Y_1''. \quad (2.19)$$

Запишем выражения для основных векторов симметричных составляющих токов генератора:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{r1} &= \underline{I}_{r1}' + \underline{I}_1''; \\ \underline{I}_{r2} &= \underline{I}_{r2}' + \underline{I}_2''. \end{aligned}$$

Подставляя в эти равенства выражения (2.14), (2.18) и (2.19), получим:

$$\underline{I}_{r1} = \underline{I}_1 + UY'_0 + \underline{I}_1'' = \underline{I}_1 + U(Y'_0 - 3Y''_0); \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_{r2} = \underline{I}_2 + \overset{*}{I}_0 - 3UY''_1.$$

Из условия компенсации токов обратной последовательности получим первое из уравнений для определения параметров симметрирующего устройства СУ2:

$$Y''_1 = \frac{1}{3U} \left( \overset{*}{I}_2 + \overset{*}{I}_0 \right). \quad (2.21)$$

Второе уравнение получим, составив соотношение

$$Y''_2 \frac{1}{3} (Y''_{BC} + a^2 Y''_{CA} + a Y''_{AB}),$$

откуда

$$-Y''_2 = \overset{*}{Y}_1'' = \frac{1}{3U} \left( \overset{*}{I}_2 + \overset{*}{I}_0 \right). \quad (2.22)$$

Соотношение (2.22) является вторым уравнением для определения параметров симметрирующего устройства СУ2.

Третье уравнение найдем, взяв проводимость  $Y''_0$  произвольно. Тогда третье уравнение можно записать так:

$$Y''_0 = Y''_0. \quad (2.23)$$

Запишем отдельно полученную систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Y_1'' &= \frac{1}{3U} \left( I_2^* + I_0^* \right); \\ Y_2'' &= \frac{1}{3U} \left( I_2^* + I_0^* \right); \\ Y_0'' &= Y_0''. \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Учитывая, что  $Y_1'', Y_2'', Y_0''$  представляет собой симметричные составляющие комплексной проводимости, выразим проводимости симметрирующего устройства  $Y_{BC}'', Y_{CA}'', Y_{AB}''$  через  $Y_1'', Y_2'', Y_0''$ :

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= Y_1'' + Y_2'' + Y_0''; \\ Y_{CA}'' &= a^2 Y_1'' + a Y_2'' + Y_0''; \\ Y_{AB}'' &= a Y_1'' + a^2 Y_2'' + Y_0''. \end{aligned} \right\}$$

Подставляя в эти выражения формулы (2.24) и преобразуя, получим

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{1}{3U} \left( I_2^* - I_2^* + I_0^* - I_0^* \right) + Y_0'' = \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - 2I_0) + Y_0''; \\ Y_{CA}'' &= \frac{1}{3U} \left[ a^2 \left( I_2^* + I_0^* \right) + a \left( I_2^* + I_0^* \right) \right] + Y_0'' = \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - 2a I_0) + Y_0''; \\ Y_{AB}'' &= \frac{1}{3U} \left[ a \left( I_2^* + I_0^* \right) - a^2 \left( I_2^* + I_0^* \right) \right] + Y_0'' = \frac{j}{3U} J_m (2a I_2 - 2a^2 I_0) + Y_0''. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Запишем выражения (2.25) в следующем виде:



$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{2j}{3U} J_m (\underline{I}_2 - \underline{I}_0) + Y_0''; \\ Y_{CA}'' &= \frac{2j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_2 - a \underline{I}_0) + Y_0''; \\ Y_{AB}'' &= \frac{2j}{3U} J_m (a \underline{I}_2 - a^2 \underline{I}_0) + Y_0''. \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Выражения (2.26) позволяют определить параметры симметрирующего устройства по токам  $\underline{I}_0$  и  $\underline{I}_2$ . Так как компенсация токов нулевой и обратной последовательностей осуществляется симметрирующим устройством с реактивными элементами, то может измениться коэффициент мощности сети. Выражения (2.26), в зависимости от выбора  $Y_0''$ , позволяют осуществить симметрирование с заданными коэффициентами мощности.

Рассмотрим случай, когда наряду с симметрированием осуществляется компенсация реактивной мощности, т.е.  $\cos \varphi = 1$ . В этом случае в выражении (2.26)  $Y_0''$  должно быть выбрано из условия компенсации реактивной мощности нагрузки. Для этого запишем выражение комплекса полной мощности через симметричные составляющие:

$$\tilde{S} = \underline{U}_A^* \underline{I}_{A2} + \underline{U}_B^* \underline{I}_{B2} + \underline{U}_C^* \underline{I}_{C2} = U \left( \underline{I}_{A2}^* + a^2 \underline{I}_{B2}^* + a \underline{I}_{C2}^* \right) = 3U \underline{I}_{\Gamma 1}^*.$$

Отсюда реактивная мощность равна

$$Q = J_m \tilde{S} = 3U J_m \underline{I}_{\Gamma 1}^*.$$

Из условия компенсации реактивной мощности  $Q = 0$  получим

$$J_m \underline{I}_{\Gamma 1}^* = 0.$$

Подставляя сюда выражение для  $I_{r1}^*$  (2.20), имеем

$$J_m [\underline{I}_1 + U(Y'_0 + 3Y''_0)] = 0,$$

откуда

$$J_m (Y'_0 + 3Y''_0) = -\frac{1}{U} J_m \underline{I}_1.$$

Так как проводимости  $Y''_{BC}$ ,  $Y''_{CA}$ , и  $Y''_{AB}$  чисто реактивные, то их комплексы являются мнимыми, следовательно

$$\begin{aligned} Y'_0 + 3Y''_0 &= -\frac{j}{U} J_m \underline{I}_1; \\ Y''_0 &= -\frac{j}{3U} J_m \underline{I}_1 - \frac{1}{3} Y'_0. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Соотношение (2.27) является условием компенсации реактивной нагрузки.

Подставив (2.27) в выражение (2.26), запишем последнее в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2\underline{I}_2 - \underline{I}_1) = \frac{2j}{3U} J_m \underline{I}_0 - \frac{1}{3} Y'_0; \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 \underline{I}_2 - \underline{I}_1) - \frac{2j}{3U} J_m a \underline{I}_0 - \frac{1}{3} Y'_0; \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2a \underline{I}_2 - \underline{I}_1) - \frac{2j}{3U} J_m a^2 \underline{I}_0 - \frac{1}{3} Y'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Подставляя в выражение (2.28) соотношения, полученные из формул (2.11),

$$\left. \begin{aligned} \frac{2j}{3U} J_m I_0 &= \frac{-Y'_A + Y'_0}{3}; \\ \frac{2j}{3U} J_m a I_0 &= \frac{-Y'_B + Y'_0}{3}; \\ \frac{2j}{3U} J_m a^2 I_0 &= \frac{-Y'_C + Y'_0}{3}, \end{aligned} \right\}$$

будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_A - \frac{2}{3} Y'_0; \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_B - \frac{2}{3} Y'_0; \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2a I_2 - I_1) + \frac{1}{3} Y'_C - \frac{2}{3} Y'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Выражения (2.29) полностью решают задачу определения параметров симметрирующего устройства для компенсации как токов обратной последовательности, так и реактивной мощности несимметричной трехфазной сети. Для этого нужно определить действующее значение фазного напряжения  $U$ , симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей нагрузки и параметры симметрирующего устройства для компенсации составляющей нулевой последовательности. Если компенсация реактивной мощности не требуется, то параметры не зависят от тока прямой последовательности и в выражениях (2.29) в качестве  $I_1$  можно взять любое комплексное число.

При отсутствии нулевого провода  $I_0 = 0$ , симметрирующее устройство токов нулевой последовательности не нужно, т.е. можно считать, что  $Y'_A = Y'_B = Y'_C + Y'_0 = 0$ . Тогда выражения (2.29) для определения параметров симметрирующего устройства для компенсации токов обратной последовательности значительно упрощаются и принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1); \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (2a^2 I_2 - I_1); \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (2I_2 - I_1) \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

Выразим приводимости фаз симметрирующего устройства СУ2 через линейные токи приемника. Для этого в выражении (2.29) подставим соотношения (1.2) и продelaем соответствующие преобразования. Например, для проводимости  $Y''_{BC}$  имеем:

$$Y''_{BC} = \frac{j}{3U} J_m (a^2 I_B + aI_C + I_0) + \frac{1}{3} Y'_A - \frac{2}{3} Y'_0.$$

Учитывая в этом выражении, что

$$\frac{j}{3U} J_m I_0 = \frac{-Y'_A + Y'_0}{6},$$

получим

$$Y''_{BC} = \frac{j}{3U} J_m (a^2 I_B + aI_C) + \frac{Y'_A}{6} - \frac{Y'_0}{2}.$$

Аналогично могут быть получены выражения и для остальных двух проводимостей симметрирующего устройства СУ2:

$$\begin{aligned} Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 I_A + I_C) + \frac{Y''_B}{6} - \frac{Y''_0}{2}; \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 I_A + I_B) + \frac{Y''_C}{6} - \frac{Y''_0}{2}. \end{aligned}$$

Подставляя  $Y'_0 = \frac{1}{3}(Y'_A + Y'_B + Y'_C)$ , окончательно имеем:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C) - \frac{1}{6} (Y_B' + Y_C'); \\ Y_{CA}'' &= \frac{j}{3U} J_m (a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_A) - \frac{1}{6} (Y_C' + Y_A'); \\ Y_{AB}'' &= \frac{j}{3U} J_m (a \underline{I}_B + a \underline{I}_C) - \frac{1}{6} (Y_A' + Y_B'). \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

Рассмотрим частные случаи иллюстрационного применения предложенной методики определения параметров симметрирующего устройства для компенсации токов обратной последовательности в трехфазных сетях.

В качестве примера возьмем активную однофазную нагрузку и синтезируем для этого случая параметры симметрирующего устройства. Пусть активный однофазный приемник, проводимость которого обозначим  $g$ , включен между фазами А и В, как показано на рис.2.4. При таком включении линейные токи нагрузки равны:  $\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{U}_{AB} g$ ;  $\underline{I}_C = 0$ . Находим основные векторы токов прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{1}{3} (\underline{I}_A + a \underline{I}_B) = \frac{1}{3} (\underline{U}_{AB} g - a \underline{U}_{AB} g) = \\ &= \frac{1}{3} (1 - a^2 \cdot \underline{U}_A - \underline{U}_B) g = \frac{1}{3} (1 - a) \cdot (1 - a^2) \underline{U} g; \\ \underline{I}_2 &= \frac{1}{3} (\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B) = \frac{1}{3} (1 - a^2)^2 \underline{U} g. \end{aligned}$$

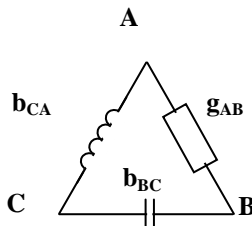


Рис.2.4 – Симметрирование трехпроводной трехфазной сети при однофазной активной нагрузке

Учитывая, что  $(1-a)(1-a^2)=3$  и  $(1-a)^2=-3a^2$ ,  
получим

$$\underline{I}_1 = \underline{U}g; \underline{I}_2 = a^2 \underline{U}g. \quad (2.32)$$

Подставив соотношения (2.32) в выражения (2.30), получим проводимости фаз симметрирующего устройства:

$$\left. \begin{aligned} Y''_{BC} &= \frac{j}{3U} J_m (-2a^2 U g - U g) = \frac{j}{\sqrt{3}} g; \\ Y''_{CA} &= \frac{j}{3U} J_m (-2a U g - U g) = -\frac{j}{\sqrt{3}} g; \\ Y''_{AB} &= \frac{j}{3U} J_m (-2U g - U g) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Из выражений (2.33) следует, что

$$|b_{BC}| = b_{CA} = \frac{g}{\sqrt{3}}; b_{AB} = 0, \text{ причем проводимость } b_{CA} \text{ имеет}$$

индуктивный характер. Получившийся индуктивно-емкостный компенсатор обратной последовательности является известной схемой Штеймеца, состоящей из конденсаторной батареи и дросселя (рис. 2.4.).

Во втором примере осуществим синтез параметров симметрирующего устройства для компенсации токов обратной последовательности при двухфазном активном приемнике и отсутствие токов нулевой последовательности.

Пусть двухфазный активный приемник подключен к трехфазной сети по схеме, приведенной на рис.2.5.

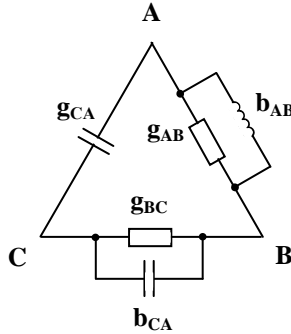


Рис. 2.5 – Схема симметрирующего устройства

Проводимости фаз приемника обозначим через  $g_{AB}$  и  $g_{BC}$  соответственно. Определим параметры симметрирующего устройства для компенсации токов обратной последовательности, обусловленных несимметрией, вносимой такими нагрузками. Запишем выражения для линейных токов нагрузки

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} g_{AB} = (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{BC} = -\underline{U}_{BC} g_{BC} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = \underline{U}_{BC} g_{BC} - \underline{U}_{AB} g_{AB} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} - (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Получим соотношения для основных векторов симметричных составляющих токов нагрузки. Для этого подставим выражения (2.34) в формулы (1.2) для  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$ :

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{1}{3} \{ (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB} + d[(\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} - (\underline{U}_A - \underline{U}_B) g_{AB}] + \\ &\quad + a^2 (\underline{U}_C - \underline{U}_B) g_{BC} \}; \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{U}}{3} [(1 - a^2) g_{AB} + a^2 (a^2 - a) g_{BC} - a^2 (1 - a^2) g_{AB} + \\ &\quad + a(a - a^2) g_{BC}]. \end{aligned}$$

Преобразовав эти выражения, получим:

$$I_1 = \frac{U}{3} (g_{AB} + g_{BC}) (2 - a - a^2);$$

$$I_2 = \frac{U}{3} [a(a-1)^2 g_{AB} - 3g_{BC}].$$

Учитывая, что  $2 - a - a^2 = 3$ ,  $a(a-1)^2 = 3 - a^2$ , окончательно имеем:

$$I_1 = U(g_{AB} + g_{BC});$$

$$I_2 = \frac{U}{3} [(3 - a^2)g_{AB} - 3g_{BC}].$$

Подставляя эти соотношения в формулы (2.30), получим выражения для определения проводимостей фаз симметрирующего устройства

$$Y''_{BC} = \frac{j}{3U} J_m \left[ 2 \frac{U}{3} a(a-1)^2 g_{AB} - 6g_{BC} \right] =$$

$$= \frac{j}{9} J_m (2g_{AB} - 4a^2 g_{AB} + 2g_{AB} - 18g_{BC});$$

$$Y''_{CA} = \frac{j}{3U} J_m \left[ 2 \frac{U}{3} a(a-1)^2 g_{AB} - 6a^2 g_{BC} \right] =$$

$$= \frac{j}{9} J_m (2a^2 g_{AB} - 4a g_{AB} + 2g_{AB} - 6g_{BC});$$

$$Y''_{AB} = \frac{j}{3U} J_m \left[ 2 \frac{U}{3} a^2 (a-1)^2 g_{AB} - 6a g_{BC} \right] =$$

$$= \frac{j}{9} J_m (2a g_{AB} - 4a g_{AB} + 2a^2 g_{AB} - 6a g_{BC}).$$

Преобразовав эти выражения, окончательно будем иметь:



$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{\sqrt{3}} g_{AB}, \\ Y_{CA}'' &= \frac{j}{\sqrt{3}} (g_{AB} - g_{BC}), \\ Y_{AB}'' &= -\frac{j}{\sqrt{3}} g_{BC}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Таким образом, реактивные проводимости фаз симметрирующего устройства связаны с проводимостями двухфазной нагрузки следующими равенствами:

$$b_{AB} = \frac{g_{BC}}{\sqrt{30}}; \quad b_{BC} = -\frac{g_{AB}}{\sqrt{3}}; \quad b_{CA} = -\frac{(g_{AB} - g_{BC})}{\sqrt{3}},$$

т.е. проводимость  $b_{BC}$  должна иметь емкостный характер, проводимость  $b_{AB}$  - индуктивный, а проводимость  $b_{CA}$  зависит от соотношения проводимостей нагрузки. Если  $g_{BC} > g_{AB}$ , то проводимость  $b_{CA}$  имеет емкостный характер, а если  $g_{BC} < g_{AB}$ , то индуктивный. В том случае, когда проводимости нагрузок равны ( $g_{AB} = g_{BC}$ ),  $b_{CA} = 0$ . Схемы симметрирующих устройств для рассмотренных случаев представлены на рис. 2.5, 2.6, 2.7.

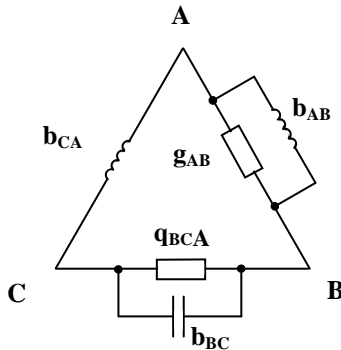


Рис. 2.6 – Схема симметрирующего устройства

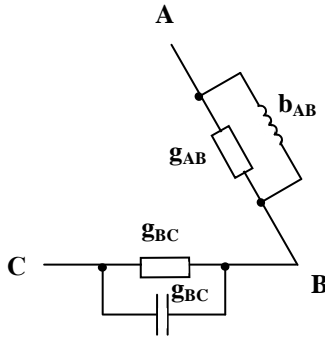


Рис. 2.7 – Схема симметрирующего устройства

В качестве третьего примера интересно рассмотреть синтез параметров симметрирующего устройства компенсации токов нулевой и обратной последовательностей в четырехпроводной трехфазной сети. Пусть в четырехпроводной трехфазной сети нагружены два линейных и два фазных напряжения активной нагрузкой. Выразим линейные токи через проводимости приемников:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}'_A + \underline{I}_{AB} = \underline{U}_A g_A + \underline{U}_{AB} g_{AB} = U [g_A + g_{AB} (1 - a^2)]; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = (\underline{U}_B - \underline{U}_C) g_{BC} + (\underline{U}_B - \underline{U}_A) g_{AB} = \\ &= U [(a^2 - a) g_{BC} + (a^2 - 1) g_{AB}]; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_C - \underline{I}_{AB} = \underline{U}_C g_C + (\underline{U}_C - \underline{U}_B) g_{BC} = U [a g_{BC} + (a - a^2) g_{BC}]. \end{aligned}$$

Найдем соотношения для основных векторов симметричных составляющих токов рассматриваемой СЭС. Для этого подставим соотношения (2.36) в выражения (1.2):

$$\underline{I}_0 = \frac{U}{3} [g_A + (1 - a^2) g_{AB} + (a^2 - a) g_{BC} + (a^2 - 1) g_{AB} + a g_C + (a - a^2) g_{BC}];$$

$$I_1 = \frac{U}{3} [g_A + (1-a^2)g_{AB} + (1-a^2)g_{BC} + (1-a)g_{AB} + g_C + (1-a)g_{BC}],$$

$$I_2 = \frac{U}{3} [g_A + (1-a^2)g_{AB} + (a-1)g_{BC} + (a-a^2)g_{AB} + a^2g_C + (a^2-1)g_{BC}].$$

Преобразовав эти выражения, получим следующие формулы:

$$I_0 = \frac{U}{3} (g_A + ag_C);$$

$$I_1 = \frac{U}{3} (g_A + g_C + 3g_{BC} + 3g_{AB});$$

$$I_2 = \frac{U}{3} (g_A - 3g_{BC} - 3a^2g_{AB} + a^2g_C).$$

Подставляя эти выражения в формулы (2.29), получим:

$$Y''_{BC} = \frac{j}{3U} J_m \left[ \frac{U}{3} (2g_A - 6g_{BC} - 6a^2g_{AB} + 2a^2g_C - \right.$$

$$\left. - 2g_A - 2a_C - g_A - g_C - 3g_{BC} - 3g_{AB}) \right];$$

$$Y''_{CA} = \frac{j}{3U} J_m \left[ \frac{U}{3} (2a^2g_A - 6a^2g_{BC} - 6ag_{AB} + 2ag_C - \right.$$

$$\left. - 2ag_A - 2ag_C - g_A - g_C - 3g_{BC} - 3g_{AB}) \right];$$

$$Y''_{AB} = \frac{j}{3U} J_m \left[ \frac{U}{3} (2ag_A - 6ag_{BC} - 6g_{AB} + 2g_C - \right.$$

$$\left. - 2a^2g_A - 2g_C - g_A - g_C - 3g_{BC} - 3g_{AB}) \right].$$

Окончательно эти выражения для определения параметров симметрирующего устройства приобретают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} Y_{BC}'' &= \frac{j}{3\sqrt{3}} (3g_{AB} - 2g_C); \\ Y_{CA}'' &= \frac{j}{3\sqrt{3}} (-2g_A + 2g_C + 3g_{BC} - 3g_{AB}); \\ Y_{AB}'' &= \frac{j}{3\sqrt{3}} (2g_A - 3g_{BC}). \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

Из выражений (2.37) следует, что проводимости элементов симметрирующего устройства связаны с проводимостями нагрузки следующими равенствами:

$$\begin{aligned} b_{AB} &= -\frac{2g_A - 3g_{BC}}{3\sqrt{3}}; \\ b_{BC} &= -\frac{3g_{AB} - 2g_C}{3\sqrt{3}}; \\ b_{CA} &= -\frac{-2g_A + 2g_{BC} - 3g_{AB}}{3\sqrt{3}}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что проводимости элементов симметрирующего устройства в зависимости от соотношения проводимостей нагрузки могут иметь различный характер. В качестве примера в табл. 2.1 указан характер элементов симметрирующего устройства для различных соотношений проводимостей нагрузок, а на рис. 2.8 приведены схемы симметрирующих устройств для рассмотренных случаев.

Приведенные примеры наглядно показывают, насколько упрощается синтез параметров симметрирующего устройства по разработанной методике [62].

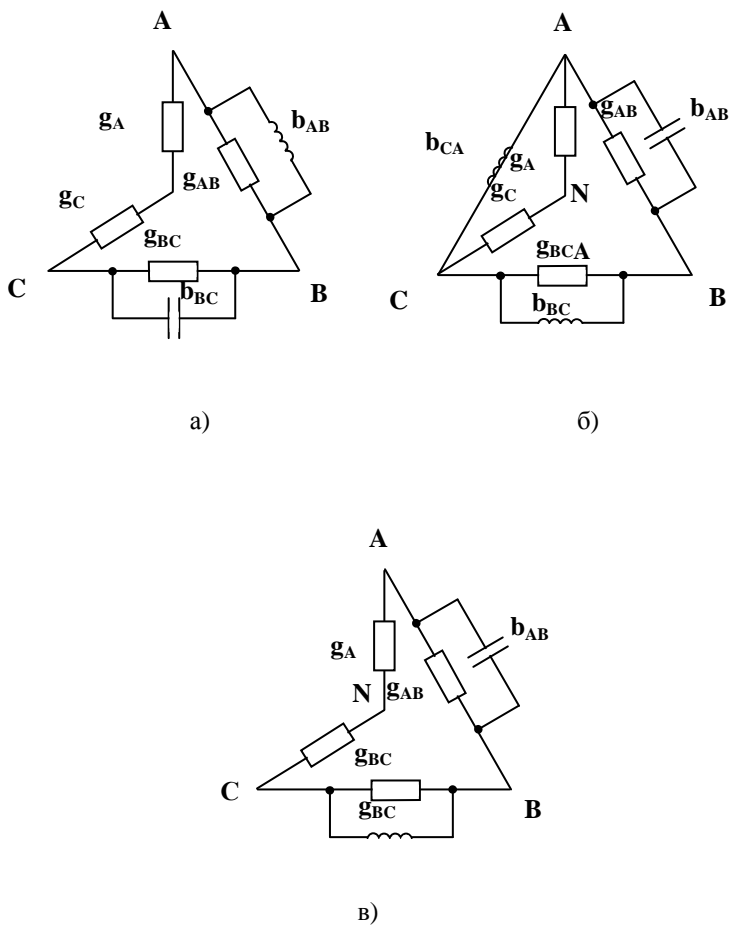
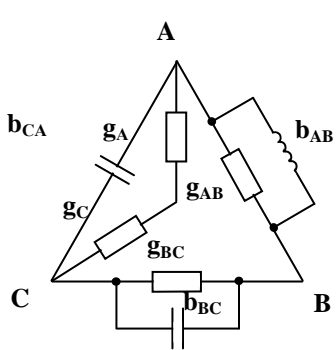
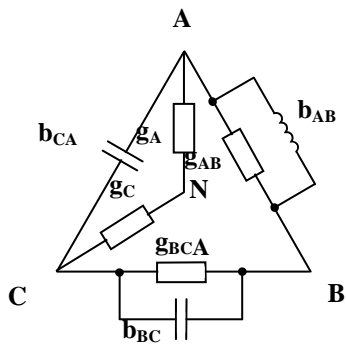


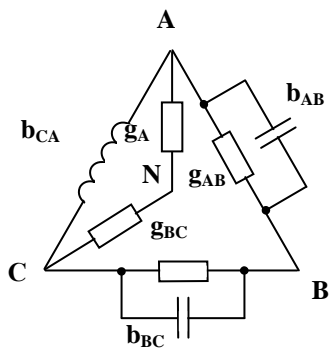
Рис. 2.8 – Симметрирование трехфазных сетей при различном соотношении проводимостей нагрузок



г)



д)



ж)

Таблица 2.1- Примеры синтеза схем симметрирующих устройств

№ п/п	Соотношение проводимостей	Характеристика проводимостей симметрирующего устройства			Рис.
1.	$g_{BC}=g_{AB}=g_A=g_C$	индукт.	0	емкостн.	2.8а
2.	$g_A>g_C=1,5g_{BC}<1,5g_{AB}$	емкостн.	индукт.	индукт.	2.8б
3.	$g_A=g_C<1,5g_{BC}>1,5g_{AB}$	емкостн.	0	индукт.	2.8в
4.	$g_{AB}=g_{BC}>g_C>g_A$	индукт.	емкостн.	емкостн.	2.8г
5.	$g_{AB}=g_{BC}>g_C>g_A$	индукт.	емкостн.	емкостн.	2.8д
6.	$1,5g_{AB}>g_A=g_C>1,5g_{BC}$	емкостн.	индукт.	емкостн.	2.8ж

## 2.4. Методы симметрирования трехфазных сетей по мощности

В предыдущих разделах были предложены методы симметрирования трехфазных сетей, основанные на использовании в качестве информационных параметров либо симметричных составляющих токов нагрузки, либо действующих значений этих токов. В данном разделе исследована возможность симметрирования систем электроснабжения, если в качестве информационных параметров выбраны мощности фаз. Используя выражение (2.11), выразим комплексные проводимости симметрирующего устройства для компенсации токов нулевой последовательности через комплексы полной мощности фаз нагрузки. Для этого первые члены правой части каждого из уравнений (2.11) умножим и разделим на  $U$  и учтем, что

$$Im \dot{I}^* = -Im \dot{I}.$$

Тогда получим:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U^2} J_m \cdot \left( U I_A^* + U I_B^* + U I_C^* \right) + Y'_0; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U^2} J_m \cdot \left[ a \left( U I_A^* + U I_B^* + U I_C^* \right) \right] + Y'_0; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U^2} J_m \cdot \left[ a^2 \left( U I_A^* + U I_B^* + U I_C^* \right) \right] + Y'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

Перейдем в этих выражениях к комплексам полной мощности фаз приемника, используя равенства

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A &= \underline{U}_A I_A^* = U I_A^*; \\ \tilde{S}_B &= \underline{U}_B I_B^* = a^2 U I_B^*; \\ \tilde{S}_C &= \underline{U}_C I_C^* = a U I_C^*. \end{aligned}$$

Получим:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{2j}{3U^2} J_m \left( \tilde{S}_A + a \tilde{S}_B + a^2 \tilde{S}_C \right) + Y'_0; \\ Y'_B &= \frac{2j}{3U^2} J_m \left( a \tilde{S}_A + a^2 \tilde{S}_B + \tilde{S}_C \right) + Y'_0; \\ Y'_C &= \frac{2j}{3U^2} J_m \left( a^2 \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + a \tilde{S}_C \right) + Y'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Переходя в этих уравнениях от полной мощности к активной и реактивной мощностям и преобразуя, получим:

$$\left. \begin{aligned} Y'_A &= \frac{j}{3U^2} \left[ (Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) + \sqrt{3}(P_B - P_C) \right] + Y'_0; \\ Y'_B &= \frac{j}{3U^2} \left[ (Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) + \sqrt{3}(P_C - P_A) \right] + Y'_0; \\ Y'_C &= \frac{j}{3U^2} \left[ (Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_b) + \sqrt{3}(P_A - P_B) \right] + Y'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$



Уравнения (2.40) позволяют определить параметры симметрирующего устройства по активным и реактивным мощностям фаз приемника. Эти уравнения дают возможность определить реактивную мощность фаз симметрирующего устройства. Действительно, принимая во внимание, что проводимости фаз симметрирующего устройства имеют чисто реактивный характер

(2.11), запишем выражение (2.40) в виде

$$\left. \begin{aligned} -Q'_A &= \frac{1}{3} [(Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) + \sqrt{3}(P_B - P_C) - Q'_0]; \\ -Q'_B &= \frac{1}{3} [(Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) + \sqrt{3}(P_C - P_A) - Q'_0]; \\ -Q'_C &= \frac{1}{3} [(Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) + \sqrt{3}(P_A - P_B) - Q'_0], \end{aligned} \right\}. \quad (2.41)$$

где  $Q'_A = U^2 b_A$ ,  $Q'_B = U^2 b_B$ ,  $Q'_C = U^2 b_C$  - реактивные мощности фаз симметрирующего устройства:

$$Q'_0 = \frac{U^2}{3} (b_A + b_B + b_C) = \frac{1}{3} (Q'_A + Q'_B + Q'_C),$$

где  $Q'_0$  - реактивная мощность исходной части симметрирующего устройства с номинальными параметрами, относительно которых происходит их перестройка в процессе симметрирования.

Аналогичными преобразованиями уравнений (2.31) можно выразить через мощности фаз нагрузки параметры симметрирующего устройства для компенсации составляющей обратной последовательности токов. Опуская промежуточные преобразования, запишем окончательные выражения:

$$\left. \begin{aligned} -Q''_{BC} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(P_B - P_C) + \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C) + Q'_0; \\ -Q''_{CA} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(P_C - P_A) + \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C) + Q'_0; \\ -Q''_{AB} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(P_A - P_B) + \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C) + Q'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Выражения (2.42) можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Q''_{BC} &= -\frac{2}{\sqrt{3}}(P_B - P_C) + Q''_0; \\ Q''_{CA} &= -\frac{2}{\sqrt{3}}(P_C - P_A) + Q''_0; \\ Q''_{AB} &= -\frac{2}{\sqrt{3}}(P_A - P_B) + Q''_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

где  $Q''_0$  - реактивная мощность исходной части симметрирующего устройства с номинальными параметрами, относительно которых происходит их перестройка в процессе симметрирования:

$$Q''_0 = -Q'_0 - \frac{1}{3}(Q_A + Q_B + Q_C).$$

Рассмотрим случай, когда в трехфазной сети отсутствуют токи нулевой последовательности:

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = 0. \quad (2.44)$$

Умножим сопряженный комплекс выражения (2.44) на фазное напряжение  $\underline{U}$ :

$$\underline{U} \overset{*}{I}_A + \underline{U} \overset{*}{I}_B + \underline{U} \overset{*}{I}_C = 0.$$

Считая, что система фазных напряжений источника симметрична, запишем

$$\underline{U}_A^* I_A + a \underline{U}_B^* I_B + a^2 \underline{U}_C^* I_C = 0,$$

откуда

$$\tilde{S}_A + a \tilde{S}_B + a^2 \tilde{S}_C = 0,$$

или

$$(P_A + jQ_A) + a(P_B + jQ_B) + a^2(P_C + jQ_C) = 0.$$

Приравнявая отдельно нулю вещественную и мнимую части этих выражений, получим:

$$\begin{aligned} P_A - \frac{1}{2}P_B + \frac{1}{2}P_C + \frac{\sqrt{3}}{2}(Q_C - Q_B) &= 0; \\ Q_A - \frac{1}{2}Q_B - \frac{1}{2}Q_C + \frac{\sqrt{3}}{2}(P_B - P_C) &= 0. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Преобразовав выражение (2.45), получим следующие соотношения для активных и реактивных мощностей фаз:

$$\begin{aligned} (Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) + \sqrt{3}(P_B - P_C) &= 0; \\ (Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) + \sqrt{3}(P_C - P_A) &= 0; \\ (Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) + \sqrt{3}(P_A - P_B) &= 0. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Принимая во внимание равенство (2.42), и если  $Q'_0 = 0$ , то получим упрощенное условие компенсации токов обратной последовательности по реактивным мощностям фаз:

$$\left. \begin{aligned} -Q''_{BC} &= -Q_A + Q_B + Q_C; \\ -Q''_{CA} &= -Q_B + Q_C + Q_A; \\ -Q''_{AB} &= -Q_C + Q_A + Q_B. \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

При отсутствии тока обратной последовательности  $I_2 = 0$  после преобразований, можно записать следующие соотношения для активных и реактивных нагрузок:

$$\begin{aligned} (Q_A - Q_B) + (Q_A - Q_C) - \sqrt{3}(P_B - P_C) &= 0; \\ (Q_B - Q_C) + (Q_B - Q_A) - \sqrt{3}(P_C - P_A) &= 0; \\ (Q_C - Q_A) + (Q_C - Q_B) - \sqrt{3}(P_A - P_B) &= 0. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Учитывая эти соотношения в выражениях (2.41) и (2.42), получим параметры симметрирующего устройства, обеспечивающие компенсацию токов нулевой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} Q'_A &= -\frac{2}{3}(2Q_A - Q_B - Q_C) + Q'_0; \\ Q'_B &= -\frac{2}{3}(2Q_B - Q_C - Q_A) + Q'_0; \\ Q'_C &= -\frac{2}{3}(2Q_C - Q_A - Q_B) + Q'_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

Рассмотренная методика симметрирования трехфазных четырехпроводных сетей позволяет по активным и реактивным мощностям нагрузки определить параметры СУ, т.е. скомпенсировать токи нулевой и обратной последовательностей [62, 83].

## 2.5. Симметрирование и компенсация реактивной мощности в трехфазных сетях

В тех случаях, когда известны параметры нагрузки, параметры симметрирующего устройства удобно выразить через них [62,63]. В этом случае токи обратной и нулевой последовательностей нагрузки  $\underline{I}_2$  и  $\underline{I}_0$  определяются через параметры нагрузки аналогичными формулами (2.6) и (2.21) выражениями. Подставляя в соотношении (2.11) и (2.26) значения токов  $\underline{I}_2$  и  $\underline{I}_0$ , выраженные через параметры нагрузки  $Y_A^H, Y_B^H, Y_C^H, Y_{AB}^H, Y_{BC}^H, Y_{CA}^H$ , найдем:

$$\begin{aligned}\Delta b_A &= -\Delta b_A^H + \frac{1}{\sqrt{3}}(g_C^H + g_B^H); \\ \Delta b_{BC} &= -\Delta b_{BC}^H + \frac{1}{\sqrt{3}}(g_{CA}^H - g_{AB}^H) + \frac{2}{3\sqrt{3}}(g_C^H - g_B^H),\end{aligned}\quad (2.50)$$

где  $\Delta b_A^H$  и  $\Delta b_{BC}^H$  - несимметричные части реактивных проводимостей нагрузки:

$$\begin{aligned}\Delta b_A^H &= b_A^H - \frac{1}{3}(b_A^H + b_B^H + b_C^H); \\ \Delta b_{BC}^H &= b_{BC}^H - \frac{1}{\sqrt{3}}(b_{BC}^H + b_{CA}^H + b_{AB}^H).\end{aligned}$$

Остальные параметры получаем циклической перестановкой индексов A, B, C.

Для трехпроводной сети

$$g_A^H = g_B^H = g_C^H = b_A^H = b_C^H = 0,$$

тогда

$$\Delta b_{BC} = -\Delta b_{BC}^H + \frac{1}{\sqrt{3}}(g_{CA}^H - g_{AB}^H). \quad (2.51)$$

Следует также отметить, что реактивная мощность,

вносимая найденными выше параметрами симметрирующего устройства, равна

$$\Delta Q = U^2 (\Delta b_A + \Delta b_B + \Delta b_C + \Delta b_{BC} + \Delta b_{CA} + \Delta b_{AB}) = 0.$$

Поэтому симметрирующее устройство с вычисленными параметрами не изменяет коэффициента мощности сети. Для получения заданного коэффициента мощности следует использовать параметры симметричной его части (проводимости нулевой последовательности), определяемые соотношениями (2.4) и (2.17). Очевидно, добавление любой симметричной части к симметрирующему устройству не изменяет условий симметрирования, но позволяет получить требуемый коэффициент мощности. Реактивная мощность  $Q^C$ , вносимая симметричной частью, равна

$$Q^C = 3U^2 (b'_0 + 3b''_0). \quad (2.52)$$

Обозначив через  $\cos \varphi$  - исходный, а через  $\cos \theta$  требуемый коэффициент мощности, получим:

$$b'_0 + 3b''_0 = \frac{P}{3U^2} (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi), \quad (2.53)$$

где  $P$  - активная мощность нагрузки.

Соотношение (2.53) позволяет получить любые фазовые сдвиги  $-\frac{\pi}{3} < \theta < \frac{\pi}{2}$ , в том числе и  $\theta = 0$ , для которого

$$b'_0 + 3b''_0 = -\frac{Q}{3U^2}, \quad (2.54)$$

где  $Q$  - реактивная мощность нагрузки.

Соотношение (2.54) определяет выбор симметричной части СУ для обеспечения  $\cos \varphi = 1$ . Это соотношение позволяет

определить параметры симметричной части СУ для обеспечения заданного коэффициента мощности в трехфазной трехпроводной сети.

Выбрав величины  $b'_0$  и  $b''_0$ , удовлетворяющие соотношениям (2.52) или (2.53), находим окончательные выражения для определения параметров симметрирующего устройства:

$$\begin{aligned} Y_A &= Y'_0 + \Delta Y_A; & Y_B &= Y'_0 + \Delta Y_B; & Y_C &= Y'_0 + \Delta Y_C; \\ Y_{AB} &= Y''_0 + \Delta Y_{AB}; & Y_{BC} &= Y''_0 + \Delta Y_{BC}; & Y_{CA} &= Y''_0 + \Delta Y_{CA}, \end{aligned} \quad (2.55)$$

где  $\Delta Y_A, \Delta Y_B, \Delta Y_C, \Delta Y_{AB}, \Delta Y_{BC}, \Delta Y_{CA}$  - несимметричные части СУ.

Следует отметить, что в выражениях (2.52) и (2.53) не определяем обе величины  $b'_0$  и  $b''_0$  однозначно, но оставляем свободным один из параметров. Этой степенью свободы можно распорядиться так, чтобы удовлетворить какому-либо добавочному условию. Например, можно поставить задачу о выборе параметров  $b'_0$  и  $b''_0$ , удовлетворяющих условию (2.52) и минимизирующих какую – либо целевую функцию.

В качестве целевой функции может быть взята суммарная (по абсолютной величине) мощность в реактивных элементах симметрирующего элемента или максимальное значение проводимости элементов симметрирующего устройства, или время переходного процесса и т.п.

Рассмотрим только одну возможность. Если взять величину  $b'_0 = -\Delta b_A(-\Delta b_B, -\Delta b_C)$  или  $b''_0 = -\Delta b_{BC}(-\Delta b_{CA}, -\Delta b_{AB})$ , то шестиэлементная схема на рис. 2.9. станет пятиэлементной (рис. 2.10).

Сказанное относится и к четырехпроводной линии. Для трехпроводной линии  $\Delta b_A = \Delta b_B = \Delta b_C = 0$ , поэтому для симметрирования достаточно трех параметров (если положить  $b'_0 = 0$ , а  $b''_0$  определить соотношения (2.52) и (2.53)).

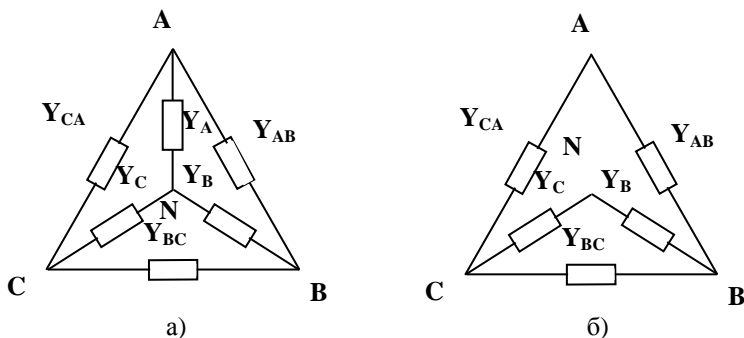


Рис. 2.9 – Шестиэлементная схема симметрирования

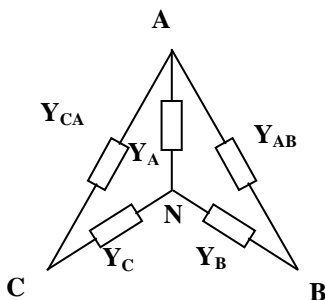


Рис. 2.10 – Пятиэлементная схема симметрирования

Если рассматривать задачу только симметрирования и не беспокоиться о коэффициенте мощности, то, положив для четырехпроводной сети  $b'_0 = \Delta b_A$ ,  $b''_0 = \Delta b_{BC}$ , получим двухэлементную схему.

Таким образом, рассмотренные методы позволяют по проводимостям нагрузки определить параметры симметрирующих устройств, осуществляющих компенсацию токов нулевой и обратной последовательностей с одновременной компенсацией реактивной мощности.



## 2.6. Погрешность и устойчивость процесса симметрирования трехфазных сетей

В предыдущих разделах при определении параметров симметрирующего устройства исходили из допущения о том, что система напряжений симметрична, несмотря на то, что система несимметрична. Это допущение может привести к погрешности в определении параметров СУ и, следовательно, к остаточной несимметрии в системе токов. При достаточно больших погрешностях остаточная несимметрия может при циклической многотактовой работе СУ привести к неустойчивости процесса симметрирования.

Рассмотрим четырехпроводную трехфазную сеть с фазными токами  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ , содержащую составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей согласно выражению (1.2) [68].

В выражении (1.2) выразим токи  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  через фазные напряжения и проводимости нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{U}_A Y_A^H + \underline{U}_A Y_{AB}^H - \underline{U}_B Y_{AB}^H - \underline{U}_C Y_{CA}^H + \underline{U}_A Y_{CA}^H; \\ \underline{I}_B &= \underline{U}_B Y_B^H + \underline{U}_B Y_{BC}^H - \underline{U}_C Y_{BC}^H - \underline{U}_A Y_{AB}^H + \underline{U}_B Y_{AB}^H; \\ \underline{I}_C &= \underline{U}_C Y_C^H + \underline{U}_C Y_{CA}^H - \underline{U}_A Y_{CA}^H - \underline{U}_B Y_{BC}^H + \underline{U}_C Y_{BC}^H. \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

В выражении (2.56) запишем фазные напряжения  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  через составляющие прямой  $\underline{U}_1$ , обратной  $\underline{U}_2$  и нулевой последовательностей. Преобразованные выражения (2.56) подставим в выражение (1.2). После преобразования выражение (1.2) можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{U}_1 (Y'_{0H} + 3Y''_{0H}) + \underline{U}_2 (Y'_{2H} - 3Y''_{2H}) + \underline{U}_0 Y'_{1H}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{U}_2 (Y'_{1H} - 3Y''_{0H}) + \underline{U}_2 (Y'_{0H} + 3Y''_{0H}) + \underline{U}_0 Y'_{2H}; \\ \underline{I}_0 &= \underline{U}_1 Y'_{2H} + \underline{U}_2 Y'_{1H} + \underline{U}_0 Y'_{0H}. \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

где

$$\begin{aligned}
Y'_{0H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + Y_B^H + Y_C^H); \\
Y'_{1H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + aY_B^H + a^2Y_C^H); \\
Y'_{2H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + a^2Y_B^H + aY_C^H); \\
Y''_{0H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + Y_B^H + Y_C^H); \\
Y''_{1H} &= \frac{1}{3} (Y_A^H + aY_B^H + a^2Y_C^H); \\
Y''_{2H} &= \frac{1}{3} (Y_{BC}^H + a^2Y_{CA}^H + aY_{AB}^H),
\end{aligned} \tag{2.58}$$

где  $Y_A^H, Y_B^H, Y_C^H$  - комплексные проводимости фаз нагрузки;

$Y_{BC}^H, Y_{CA}^H, Y_{AB}^H$  - междуфазные проводимости нагрузки.

В обычных условиях линейные напряжения симметричны. Это значит, что система фазных напряжений может содержать только составляющие прямой и нулевой последовательности. При этом для тока нулевой последовательности нагрузки имеем

$$I_0 = \underline{U}_1 Y'_{2H} + \underline{U}_0 Y'_{0H}. \tag{2.59}$$

Если выразить  $\underline{U}_0$  через проводимости фаз, то

$$\underline{U}_0 = -\frac{\underline{U}_1 Y'_{2H}}{Y'_0 + 3Y_N}, \tag{2.60}$$

где  $Y_N$  - проводимость нейтрального провода.

Следовательно, ток нулевой последовательности равен

$$I_0 = \underline{U}_1 Y'_2 \left( 1 - \frac{Y'_0}{Y'_0 + 3Y_N} \right). \tag{2.61}$$

Для того, чтобы обратить ток  $I_0$  в нуль, достаточно параллельно нагрузке подключить симметрирующее устройство с

проводимостью  $Y'_2 = Y'_{2н}$ . Тогда нагрузку вместе с симметрирующим устройством можно рассматривать как новую нагрузку с проводимостью  $Y'_2 - Y'_{2н} = 0$ , так что  $\underline{I}_0 = 0$ . Вместе с тем обратиться в нуль, как видно из выражения (2.61), и смещение нейтрали.

Поэтому если известны проводимости фаз нагрузки или хотя бы величина  $Y'_{2н}$  (2.58), то всегда можно найти реактивные проводимости фаз симметрирующего устройства  $b_A, b_B, b_C$ , обеспечивающие одновременное выполнение условий  $\underline{I} = 0$  и  $\underline{U} = 0$ :

$$\left. \begin{aligned} b_A &= -\frac{2}{3} b_A^H - \frac{1}{\sqrt{3}} (g_B^H - g_C^H) + \frac{1}{3} (b_B^H + b_C^H); \\ b_B &= -\frac{2}{3} b_B^H - \frac{1}{\sqrt{3}} (g_C^H - g_A^H) + \frac{1}{3} (b_C^H + b_A^H); \\ b_C &= -\frac{2}{3} b_C^H - \frac{1}{\sqrt{3}} (g_A^H - g_B^H) + \frac{1}{3} (b_A^H + b_B^H). \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

Заметим, что величина  $Y'_{2н}$  может быть определена и из соотношения (2.59). Здесь нужно знать лишь суммарную проводимость фаз нагрузки. Тогда, измерив величины  $\underline{I}_0, \underline{U}_0$  найдем

$$Y'_{2н} = \frac{1}{\underline{U}} (\underline{I}_0 - \underline{U}_0 Y'_{0н}).$$

Однако в ряде случаев определение  $Y'_{2н}$  может встретить затруднения. Это имеет место, например, тогда, когда нагрузка содержит как потребители, соединенные звездой с нулевым проводом, так и потребители, соединенные в треугольник или звезду без нулевого провода. Как видно из соотношений (2.57), определение  $Y'_{2н}$  только по токам и напряжениям нагрузки без дополнительной информации о междофазных проводимостях нагрузки невозможно.

Однако соотношение (2.61) позволяет по измеренному

значению тока  $\underline{I}_0$  определить приближенное значение проводимости  $\tilde{Y}'_{2H}$  :

$$\tilde{Y}'_{2H} = \frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_1} = Y'_{2H} - \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \cdot Y'_{2H}. \quad (2.63)$$

Из соотношения (2.63) для симметрирующего устройства запишем

$$Y'_2 = -\tilde{Y}'_{2H} = -\frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_1}. \quad (2.64)$$

Определение проводимостей фаз симметрирующего устройства из выражения (2.64) производим известными методами.

Так как величина  $Y'_2$  определена с погрешностью, то возникает несимметрия тока  $\Delta I_0$  :

$$\Delta I_0 = \underline{U}_1 (Y'_{2H} + Y'_2) \left( 1 - \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \right).$$

Из соотношений (2.63) и (2.64) имеем:

$$Y'_{2H} + Y'_2 = Y_{2H} - \tilde{Y}'_2 = \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} Y'_{2H}.$$

Поэтому для  $\Delta I_0$  получаем:

$$\Delta I_0 = \frac{\underline{U}_1 Y'_{2H} Y'_2}{Y'_{0H} + 3Y_N} \left( 1 - \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \right) = \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \underline{I}_0. \quad (2.65)$$

Аналогично из выражения (2.61) находим остаточную несимметрию напряжений:

$$\Delta \underline{U}_0 = - \frac{\underline{U}_1 (Y'_2 + Y'_2)}{Y'_{0H} + 3Y_N} \underline{U}_0 . \quad (2.66)$$

Соотношения (2.65) и (2.66) определяют погрешность симметрирования. Для относительной погрешности имеем:

$$\delta_C + \frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} . \quad (2.67)$$

Если проводимость нейтрального провода велика по сравнению с проводимостью нагрузки, т.е.  $Y_N \gg Y'_{0H}$ , то погрешность симметрирования будет мала

$$|\delta_C| \approx \frac{Y'_{0H}}{3Y_N} \ll 1. \quad (2.68)$$

В этом случае можно ограничиться одним циклом симметрирования. Погрешность симметрирования можно уменьшить  $n$ -кратным применением симметрирования по соотношению

$$Y'_2{}^{(n)} = \frac{I_0^{(n-1)}}{\underline{U}_1}, \quad (2.69)$$

где  $I_0^{(n-1)}$  - значение тока нулевой последовательности, полученного на  $n - m$  шаге.

После  $N$  циклов симметрирования остаточная несимметрия будет равна:

$$\delta_C^{(N)} = \frac{I_0^{(N)}}{I_0} = \frac{U_0^{(N)}}{U_0} = \left( \frac{Y'_{0H}}{Y'_{0H} + 3Y_N} \right)^N . \quad (2.70)$$

Из формулы (2.70) ясно, что для устойчивости процесса симметрирования, т.е. чтобы погрешность симметрирования уменьшалась в ходе процесса, необходимо выполнение условия:

$$q = \left| \frac{Y'_{0н}}{Y'_{0н} + 3Y_N} \right| < 1. \quad (2.71)$$

Чем меньше величина  $g$ , тем быстрее идет процесс симметрирования.

Формулы (2.70) и (2.71) позволяют определить число циклов  $N$ , за которые достигается требуемое значение погрешности  $|\delta_C|$ .

После устранения тока нулевой последовательности и смещения нейтрали устранение тока обратной последовательности производим в соответствии с формулой (2.57) по выражениям, приведенным в работе [61],

$$N = \ln \frac{1}{|\delta_C|} \bigg/ \ln \frac{1}{g}. \quad (2.72)$$

Решенная в этом разделе задача позволяет определить погрешность симметрирования трехфазных сетей. Полученные аналитические выражения дают возможность установить количество циклов симметрирования и устойчивость этого процесса при получении требуемого значения погрешности.